**Journal of Water and Soil**
https://jsw.um.ac.ir

**Research Article**
**Vol. 39, No. 1, Mar.-Apr. 2025, p. 17-34**

# Comparing the Effects of Bacterial and Fungal Biofertilizers on Wheat Yield and Water Use Efficiency under Drought Stress: The Role of ACC-deaminase and Various Fungal Formulations

**S.S. Hosseini**[1*], **F. Rejali**[2], **P. Keshavarz**[3]

1- Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
(*- Corresponding Author Email: sajjadhosseini1369@gmail.com)
2- Department of Soil Biology and Biotechnology, Soil and Water Research Institute, AREEO, Karaj, Iran
3- Soil and Water Research Department, Khorasan Razavi Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Mashhad, Iran

| | |
|---|---|
| Received: 08-10-2024<br>Revised: 21-01-2025<br>Accepted: 29-01-2025<br>Available Online: 29-01-2025 | **How to cite this article:**<br>Hosseini, S.S., Rejali, F., & Keshavarz, P. (2025). Comparing the effects of bacterial and fungal biofertilizers on wheat yield and water use efficiency under drought stress: The role of ACC-deaminase and various fungal formulations. *Journal of Water and Soil*, *39*(1), 17-34. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jsw.2025.90176.1440 |

## Introduction

Water scarcity is a major challenge in Iran, with annual rainfall averaging 235 to 260 mm, only a third of the global average. Wheat, a staple crop in Iran, faces severe yield reduction under drought conditions. Utilizing biofertilizers like plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) and arbuscular mycorrhizal (AM) fungi could help enhance water use efficiency (WUE) and yield in such environments. However, the effectiveness of biofertilizers varies based on several factors, including the type of biofertilizer (bacterial or fungal), the strain or species used, and the formulation (solid or liquid). Despite the established benefits of both PGPR and AM fungi in enhancing drought tolerance and WUE, there is a lack of comparative studies that examine the specific performance of bacterial versus fungal biofertilizers and their formulations under varying levels of water stress. Thus, the objectives of this study are as follows: 1) to identify the most suitable type of biofertilizer (bacterial or fungal) for improving wheat yield and WUE under drought conditions in Mashhad's climatic conditions; 2) to determine the effect of ACC deaminase enzyme on the efficiency of PGPR in enhancing wheat yield and WUE; 3) to compare the performance of AM fungal biofertilizers in two formulations (powder and liquid) and between single-species and multi-species inoculants.

## Material and Methods

The experiment was conducted as a split-plot design with three replicates, where irrigation levels constituted the main plots, and biofertilizer treatments formed the subplots. The irrigation treatments included full irrigation (100% of wheat's water requirement), mild drought stress (85%), and severe drought stress (65%). The biofertilizer treatments were: no biofertilizer (F1), serving as a control; *Pseudomonas fluorescens* producing ACC-deaminase (F2); *P. fluorescens* without ACC-deaminase (F3); AM fungi (*Rhizophagus irregularis*) in liquid form (F4); and (5) AM fungi (*R. irregularis*, *Funneliformis mosseae*, and *Claroideoglomus etunicatum*) in powdered form (F5).

## Results and Discussion

Both irrigation levels and biofertilizer types had significant impacts on root colonization, yield, and WUE.

---


https://doi.org/10.22067/jsw.2025.90176.1440

Reducing irrigation from 100% to 85% and 65% of crop water requirements significantly reduced root colonization across all treatments. Among the bacterial treatments, only *P. fluorescens* producing ACC-deaminase (F2) showed a significant positive effect under severe drought (65% irrigation). This treatment increased grain yield by 9%, biological yield by 7%, and WUE by 6.8% compared to the control (F1). The presence of ACC-deaminase likely contributed to mitigating the effects of drought-induced ethylene, promoting better root growth and nutrient uptake under water stress. In contrast, *P. fluorescens* without ACC-deaminase (F3) did not significantly improve yield or WUE, emphasizing the importance of ACC-deaminase in promoting drought tolerance. Fungal biofertilizers outperformed bacterial treatments in grain and biological yield, as well as WUE. Under severe drought, powdered AM fungi (F5) increased grain yield by 26% and biological yield by 21% compared to the control, and WUE based on grain yield improved by 26%. This superior performance of AM fungi, particularly in powdered form, can be attributed to their ability to enhance nutrient and water uptake under drought conditions. These findings corroborate earlier studies that demonstrated AM fungi's ability to improve crop yield and WUE under drought stress by enhancing water uptake, nutrient availability, and improving the plant's physiological responses, such as maintaining cell membrane stability and increasing antioxidant activity. The powdered formulation of AM fungi (F5) showed greater effectiveness than the liquid form (F4). The higher colonization rates and performance in yield improvement may be due to the inclusion of multiple fungal species in the powdered form. The performance differences between the liquid and powdered AM fungi formulations may also be influenced by the physical properties of the biofertilizer since powdered inoculants are most effective when applied to the seeds of grasses like wheat and barley, as the structure of these seeds allows for better adhesion of the powder.

## Conclusion

In conclusion, among the bacterial biofertilizers, only P. fluorescens producing ACC-deaminase significantly enhanced plant performance under severe drought, underscoring the importance of ACC-deaminase in alleviating drought stress. However, fungal biofertilizers, especially in powdered form, were more effective overall in improving yield, biological productivity, and WUE under varying levels of water stress. This research confirms that the application of AM fungi can serve as an effective strategy for improving wheat yield and increasing WUE in the climatic conditions of Mashhad. Overall, the observed differences in the effectiveness of these biofertilizers suggest that the appropriate selection of both type and formulation of biofertilizers can significantly contribute to managing water stress and improving crop production.

**Keywords:** Arbuscular mycorrhizal fungi, Drought stress, Irrigation levels, Microorganisms, PGPR

نشریه آب و خاک
https://jsw.um.ac.ir

مقاله پژوهشی
جلد ۳۹، شماره ۱، فروردین-اردیبهشت ۱٤۰٤، ص. ۳٤-۱۷

# مقایسه تأثیر کودهای زیستی باکتریایی و قارچی بر عملکرد و کارایی مصرف آب گندم در شرایط تنش آبی: نقش آنزیم ACC-دآمیناز و فرمولاسیون‌های مختلف قارچی

سیدسجاد حسینی [1*]- فرهاد رجالی [2]- پیمان کشاورز [3]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۱۷
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۱۰

## چکیده

این آزمایش با هدف انتخاب نوع کود زیستی (باکتریایی یا قارچی) و فرمولاسیون کودی مناسب برای گیاه گندم به‌صورت اسپلیت پلات در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در ایستگاه تحقیقاتی طرق، واقع در مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی در طی سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۲ اجرا شد. کرت‌های اصلی شامل سطوح آبیاری بودند: آبیاری کامل، تنش آبی ملایم و شدید که به‌ترتیب معادل ۱۰۰ درصد (۵۴۳۸ متر مکعب در هکتار)، ۸۵ درصدو ۶۵درصد نیاز آبی گیاه بود. کرت‌های فرعی شامل سطوح کود زیستی بودند: بدون کود زیستی (F1)، باکتری *Pseudomonas fluorescens* تولیدکننده آنزیم ACC-دآمیناز (F2)، باکتری *P. fluorescens* فاقد ACC-دآمیناز (F3)، قارچ میکوریز آربسکولار (AM) به‌صورت مایع (F4)، و پودری (F5). ویژگی‌های مورد مطالعه شامل درصد کلنیزاسیون ریشه، وزن هزار دانه، عملکرد دانه، عملکرد زیستی، شاخص برداشت و کارایی مصرف آب بود. نتایج نشان داد که در بین کودهای زیستی باکتریایی، تنها کاربرد تیمار F2 در تنش آبی شدید موجب افزایش ۹ درصد عملکرد دانه، ۷ درصد عملکرد زیستی، ۸/۶ درصد کارایی مصرف آب دانه و ۷ درصد کارایی مصرف آب بر حسب عملکرد زیستی نسبت به شاهد شد. کارایی کودهای زیستی قارچی نسبت به باکتریایی به‌طور قابل توجهی بیشتر بود. همچنین شکل پودری قارچ AM نسبت به مایع آن کارایی بیشتری داشت به‌طوری‌که این تیمار موجب افزایش ۲۶ و ۲۱ درصد عملکرد دانه و عملکرد زیستی، و افزایش ۲۶ و ۲۲ درصد کارایی مصرف آب برحسب عملکرد دانه و عملکرد زیستی در تنش آبی شدید شد. به‌طور کلی، تفاوت‌های مشاهده شده در کارایی کودهای زیستی نشان می‌دهد که انتخاب مناسب نوع و فرم این کودها می‌تواند نقش قابل‌توجهی در مدیریت تنش آبی و بهبود تولید محصول داشته باشد. با این حال، انجام پژوهش‌های بلند مدت برای تأیید و تقویت این نتایج ضروری است.

**واژه‌های کلیدی:** باکتری‌های PGPR، تنش خشکی، ریزجانداران، سطوح آبیاری، قارچ‌های میکوریز آرباسکولار

## مقدمه

ایران با میانگین بارندگی سالانه حدود ۲۳۵ تا ۲۶۰ میلی‌متر، تنها یک‌سوم متوسط جهانی بارش را دارد. بیش از ۸۵ درصد از مساحت کشور در مناطق خشک، نیمه‌خشک، فراخشک و بیابانی قرار دارد، که این شرایط ناشی از بارش اندک در مناطق مرکزی و جنوبی است (Olumi somarin *et al*., 2023). افزایش کارایی مصرف آب و تولید محصول بیشتر به ازای هر واحد آب مصرفی، به‌ویژه در شرایط تنش خشکی، از اولویت‌های اساسی کشاورزی پایدار است (Rahimi, Hosseinpanahi & Siosemardehm, 2019). گندم، به‌عنوان محصولی استراتژیک که حدود ۷۰ درصد کالری و پروتئین روزانه مردم

۱- گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: sajjadhosseini1369@gmail.com)
۲- بخش تحقیقات بیولوژی و بیوتکنولوژی خاک، مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران
۳- بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان خراسان رضوی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مشهد، ایران
https://doi.org/10.22067/jsw.2025.90176.1440

ایران را تأمین می‌کند، تحت تأثیر محدودیت منابع آبی و شوری خاک قرار دارد (Naseri *et al.*, 2017). در مناطق خشک و نیمه‌خشک، که بخش قابل توجهی از اراضی کشاورزی ایران را تشکیل می‌دهند، بهینه‌سازی مصرف آب و مدیریت تغذیه‌ای گیاه از طریق راهبردهایی نظیر کاربرد کودهای زیستی اهمیت زیادی دارد.

مشکلات اقتصادی ناشی از افزایش رو به رشد هزینه کودهای شیمیایی از یک سو و مسائل زیست محیطی مرتبط به مصرف غیراصولی این کودها از سوی دیگر تفکر استفاده از کودهای زیستی را برای تقویت رشد گیاهان در شرایط تنش‌های محیطی افزایش داده است (Cardoso & Kuyper, 2006; Jiriaie, Fateh, & Aynehband, 2014). این کودها شامل مجموعه‌ای از ریزجانداران مفید نظیر باکتری‌های ریزوسفری محرک رشد گیاه (PGPR)[1] و قارچ‌های میکوریز آرسکولار (AM)[2] هستند که از طریق تعاملات مثبت با گیاهان، تأثیرات مثبتی بر رشد و عملکرد محصولات زراعی دارند (Nadeem *et al.*, 2014).

باکتری‌های ریزوسفری محرک رشد گیاه می‌توانند از طریق افزایش فراهمی عناصرغذایی در ریزوسفر، بهبود مورفولوژی ریشه و ساقه، اعمال مکانیسم‌های آنتی‌اکسیدانی، افزایش پایداری آب در گیاه، تشکیل بیوفیلم برای بهبود دسترسی به آب و تولید متابولیت‌های ثانویه و هورمون‌های گیاهی تحمل گیاه به خشکی و در نتیجه عملکرد محصول را افزایش دهند (Ahluwalia *et al.*, 2021; Carmen *et al.*, 2016; Kumar *et al.*, 2019; Li *et al.*, 2020; Lim & Kim, 2013). اتیلن یک هورمون گازی تنش‌زا است که بیوسنتز آن معمولاً در سیستم‌های ریشه گیاهانی که تحت تنش آبی قرار دارند، افزایش می‌یابد و باعث مهار رشد ریشه می‌شود. بنابراین، اثرات منفی تنش آبی در گیاهان می‌تواند از طریق کاهش تولید اتیلن توسط سیستم ریشه کاهش یابد، که در این صورت ریشه‌ها می‌توانند به رشد خود ادامه داده و کارکرد خود را حفظ کنند (Brunetti *et al.*, 2021). برخی از سویه‌های PGPR که دارای فعالیت آنزیم ۱-آمینو سیکلوپروپان-۱-کربوکسیلات (ACC)-دآمیناز[3] هستند، قادرند با تجزیه ACC به α-کتوبوتیرات و آمونیاک، اثرات منفی اتیلن تنشی را کاهش داده و به این ترتیب رشد و کارایی گیاه را بهبود بخشند (Cheng, Park, & Glick, 2007; Glick, Penrose, & Li, 1998). بنابراین به نظر می‌رسد سویه‌های PGPR با قابلیت تولید آنزیم ACC-دآمیناز از طریق افزایش توسعه ریشه کارایی بیشتری نسبت به سایر سویه‌های PGPR که فاقد این قابلیت هستند، در افزایش تحمل گیاه به خشکی، افزایش عملکرد محصول و در نتیجه افزایش کارایی مصرف آب داشته باشند. این پرسشی است که در این پژوهش به آن پاسخ داده خواهد شد.

قارچ‌های AM یکی از مهمترین انواع کودهای زیستی به‌شمار می‌روند که به افزایش تحمل گیاهان در برابر تنش خشکی کمک می کنند. این قارچ‌ها با حفظ یکپارچگی غشای سلولی، افزایش محتوای آب گیاه، بهبود جذب آب و عناصر غذایی، و در نتیجه ارتقاء کارایی مصرف آب، به رشد گیاهان تحت شرایط خشکی کمک می‌کنند (Khan, Shah, & Tian, 2022; Ruíz-Sánchez *et al.*, 2011; Tang *et al.*, 2022). علاوه بر این، قارچ‌های AM از سیستم فتوسنتزی در برابر تنش‌های اکسیداتیو ناشی از خشکی محافظت کرده و کارایی فتوسنتزی، تجمع اسمولیت‌ها، فنل‌ها و هورمون‌ها را بهبود می‌بخشد (Amiri *et al.*, 2015; Ruíz-Sánchez *et al.*, 2011; Tang *et al.*, 2022). همچنین، این قارچ‌ها با افزایش فعالیت‌های آنتی اکسیدانی و بیان ژن‌ها، تجمع گونه‌های فعال اکسیژن را کاهش می دهند که این امر به تحمل گیاهان در برابر تنش خشکی کمک می‌کند (Hashem *et al.*, 2016; Li *et al.*, 2019; Tang *et al.*, 2022). پژوهش‌های مختلفی افزایش تحمل به خشکی، افزایش عملکرد محصول و افزایش کارایی مصرف آب را در حضور قارچ‌های AM گزارش کرده‌اند (Majidi & Rejali, 2023; Mathur, Tomar, & Jajoo, 2019; Oliveira *et al.*, 2016; Omidvari, Salamati, & Abdi, 2020; Yagini *et al.*, 2020). با این حال کارایی کودهای زیستی (چه قارچی و چه باکتریایی) در بهبود رشد گیاه براساس نوع خاک (ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی)، شرایط اقلیمی (دما و میزان بارندگی)، نوع گونه گیاهی، عملیات‌های کشاورزی و روش کاربرد کود زیستی متفاوت است (Malusà *et al.*, 2016). بنابراین، شناسایی کود زیستی مناسب (قارچ AM یا PGPRها) برای گیاه گندم در شرایط اقلیمی ایران و تحت تنش آبی در مزرعه امری ضروری است.

یکی از عوامل مؤثر بر کارایی کودهای زیستی، نوع فرمولاسیون کود زیستی است (Malusà *et al.*, 2016; Saif *et al.*, 2021). پژوهش‌های گذشته در مورد اثر فرمولاسیون قارچ‌های AM عمدتاً بر روی اثر نوع حامل از قبیل پیت، ورمی‌کولایت، بیوچار، سنگ فسفات و غیره متمرکز بوده است (Barazetti *et al.*, 2019; Garmendia & Mangas, 2014) و کمتر به اثر شکل فیزیکی کود زیستی (جامد یا مایع) پرداخته شده است. در حال حاضر، کودهای زیستی حاوی قارچ‌های AM به دو شکل جامد و مایع عرضه می‌شوند. فرم جامد این کودها شامل بسترهای کشت حاوی اندام‌های فعال قارچ (خاک آلوده به قارچ AM)، پودر و گرانول است (Sahu & Brahmaprakash 2016; Siddiqui & Kataoka, 2011). باسیرو و همکاران در پژوهشی که بر روی ۶۸ نوع کود زیستی حاوی قارچ‌های AM از ۲۸ شرکت تولیدی انجام دادند، گزارش کردند که ۹۰ درصد این محصولات به شکل جامد (۶۵ درصد پودر و ۲۵ درصد گرانول) و تنها ۱۰ درصد به صورت مایع تولید شده‌اند (Basiru *et al.*, 2020). با این حال، هنوز

1- Plant Growth-Promoting Rhizobacteria
2- Arbuscular Mycorrhiza
3- AminoCyclopropane-1-Carboxylate (ACC) Deaminase

هیچ مطالعه مقایسه‌ای وجود ندارد که کارایی هر یک از این فرمولاسیون‌ها بر عملکرد محصول و کارایی مصرف آب در شرایط تنش آبی در مزرعه را مشخص کند.

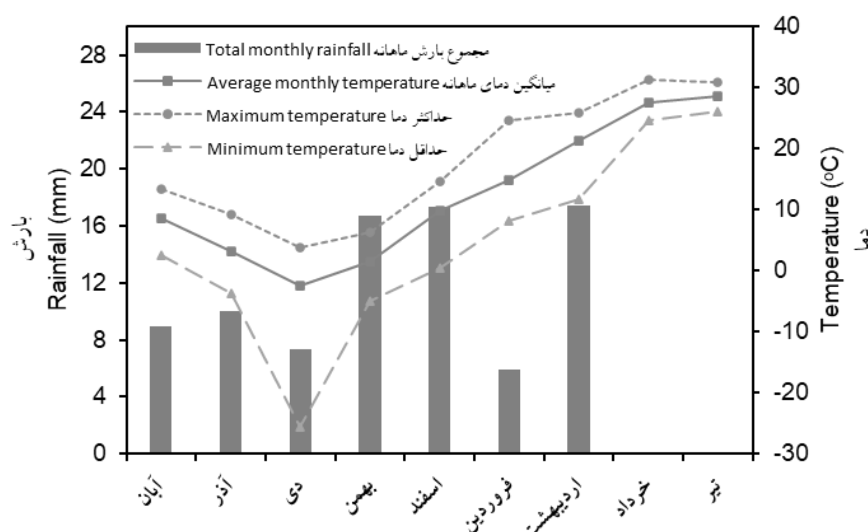
بنابراین در این پژوهش، اهداف زیر دنبال می‌شود: ۱) شناسایی مناسب‌ترین نوع کود زیستی (باکتریایی یا قارچی) به منظور افزایش عملکرد گندم و بهبود کارایی مصرف آب در شرایط تنش آبی و اقلیمی مشهد، ۲) تعیین تأثیر آنزیم ACC–دآمیناز بر کارایی باکتری‌های PGPR در افزایش عملکرد گندم و کارایی مصرف آب، و ۳) مقایسه کارایی کود زیستی حاوی قارچ‌های AM در دو فرم پودری و مایع و همچنین تک گونه و چند گونه.

## مواد و روش‌ها

این مطالعه در ایستگاه تحقیقاتی طرق، واقع در مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی (عرض جغرافیایی: ۳۶ درجه و ۱۳ دقیقه و ۱۳ ثانیه شمالی، طول جغرافیایی: ۵۹ درجه و ۳۸ دقیقه و ۴۸ ثانیه شرقی، ارتفاع از سطح دریا: ۱۰۰۳ متر) در طی سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۲ انجام شد. منطقه مورد مطالعه دارای اقلیم معتدل سرد و نیمه خشک بوده و میانگین دما سالانه و مجموع مقدار بارندگی در طی مدت زمان آزمایش به‌ترتیب ۱۷/۵ درجه سانتی‌گراد و ۸۹ میلی‌متر بود (شکل ۱). برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه در جدول ۱ نشان داده شده است.

این آزمایش به‌صورت اسپلیت پلات در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. مقدار آبیاری در سه سطح شامل: آبیاری کامل معادل ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه، تنش آبی ملایم با تأمین ۸۵ درصد نیاز آبی، و تنش آبی شدید با تأمین ۶۵ درصد نیاز آبی در کرت‌های اصلی قرار داشتند. کودهای زیستی نیز در پنج سطح شامل: شاهد بدون کود زیستی (F1)، باکتری *Pseudomonas fluorescens* با قابلیت تولید آنزیم ACC–دآمیناز (F2)، باکتری *P. fluorescens* فاقد توانایی تولید آنزیم ACC–دآمیناز (F3)، قارچ میکوریز آربسکولار *Rhizophagus irregularis* به صورت مایع (F4)، و ترکیبی از سه گونه قارچی *Rhizophagus irregularis*، *Funneliformis mosseae*، و *Claroideoglomus etunicatum* به صورت پودری (F5) در کرت‌های فرعی بودند. جمعیت هر دو مایه تلقیح باکتری مورد استفاده حدود $4\times10^{8}$ سلول باکتری در هر میلی‌لیتر بود. فعالیت آنزیم ACC–دآمیناز در سویه‌ای که قادر به تولید این آنزیم بود، به میزان ۳/۵۰۸ میکرومول α–کتوبوتیرات بر میلی‌گرم پروتئین در ساعت اندازه‌گیری شد (Jalili *et al*., 2009; Zabihi *et al*., 2011). علاوه بر این، فرم پودری قارچ AM دارای ۳۰۰ اندام فعال قارچی در هر گرم و فرم مایع آن نیز حاوی ۳۰۰ اندام فعال قارچی در هر میلی‌لیتر بود.

برای آماده‌سازی زمین، از شخم برگردان‌دار و دو مرحله دیسک متقاطع استفاده شد. سپس پشته‌هایی به عرض ۶۰ سانتی‌متر با دستگاه فاروئر ایجاد گردید. ابعاد هر کرت آزمایشی به‌صورت ۳ متر عرض و ۵ متر طول بود. هر پشته دارای سه ردیف کاشت با فاصله ۲۰ سانتی‌متر از یکدیگر بود.




**شکل ۱- میانگین، حداکثر و حداقل دمای ماهیانه و مجموع بارندگی ماهیانه محل انجام آزمایش**

**Figure 1- Average, maximum, and minimum monthly temperatures, along with total monthly precipitation at experimental site**

جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش

Table 1- Some physical and chemical properties of the soil at the experimental site

| بافت Texture | شن Sand | سیلت Silt | رس Clay | کربن آلی Organic carbon | نیتروژن کل Total nitrogen | فسفر قابل دسترس Available phosphorus | پتاسیم قابل دسترس Available potassium | کربنات کلسیم معادل Calcium carbonate equivalent | pH | EC | ویژگی Properties |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| - | % | % | % | % | mg/kg | mg/kg | mg/kg | % | - | dS/m | واحد Unit |
| لوم رسی Clay loam | 28 | 34 | 38 | 0.76 | 650 | 18.4 | 290 | 15 | 8.04 | 2.5 | مقدار Amount |

بدین ترتیب هر کرت شامل ۱۲ ردیف کاشت با تراکم ۳۵۰ بوته در متر مربع بود. همچنین، برای جلوگیری از نشت آب بین کرت‌های اصلی، فاصله ۱/۵ متر و بین کرت‌های فرعی ۱ متر در نظر گرفته شد.

در این پژوهش از گندم بهاره رقم فرین (*Triticum aestivum* L.) استفاده شد. این رقم در سال ۱۳۹۸ معرفی شده است، نسبتاً زودرس با تیپ رشد بهاره، مقاوم به ریزش، نیمه مقاوم به خوابیدگی، مقاوم به زنگ زرد و نیمه مقاوم به زنگ قهوه‌ای و در گروه ارقام با کیفیت نانوایی خوب قرار دارد. ابتدا بذرهای گندم برای ضدعفونی، به‌مدت ۳۰ ثانیه در اتانول ۷۵ درصد و سپس به‌مدت ۲ تا ۳ دقیقه در هیپوکلریت سدیم ۴ درصد قرار داده شدند و بعد از آن چندین بار با آب استریل شسته شدند تا آثار باقی‌مانده از مواد ضدعفونی‌کننده کاملاً از بین برود. کودهای زیستی مورد استفاده که از بخش تحقیقات بیولوژی و بیوتکنولوژی خاک مؤسسه تحقیقات خاک و آب تهیه شده بودند، به شکل بذرمال و درست قبل از کاشت در آزمایشگاه و در شرایط استریل به بذرهای گندم تلقیح شدند. برای این منظور، کودهای زیستی مایع (باکتریایی یا قارچی) بدون افزودن هرگونه ماده چسبنده به مقدار ۲ درصد وزن بذر روی بذرها ریخته شده و تا زمانی‌که تمام بذرها با مایه تلقیح پوشیده شوند به‌خوبی مخلوط شدند. برای فرم پودری کودهای زیستی قارچی، به هر کیلوگرم بذر گندم، ۲۰ گرم مایه تلقیح به همراه آب مقطر استریل اضافه شد و تا زمانی که بذرها با یک لایه نازک از دوغاب پوشانده شوند، هم زده شدند. پس از تلقیح کودهای زیستی، عملیات کاشت در اوایل دی ماه با استفاده از بذرکار خطی انجام شد و بعد از ۶ ماه رشد، در خرداد ماه، گیاه برداشت شد.

بر اساس توصیه کودی، تنها کود اوره به میزان ۳۵۰ کیلوگرم در هکتار به‌طور یکنواخت در تمامی کرت‌های آزمایشی قبل از کاشت (۱۰۰ کیلوگرم اوره در هکتار) و به‌صورت کودآبیاری در مراحل پنجه‌زنی (۱۵۰ کیلوگرم اوره در هکتار) و ساقه‌دهی (۱۰۰ کیلوگرم اوره در هکتار) مصرف شد. در مرحله قبل از پنج برگی، برای اطمینان از استقرار مناسب گیاه، آبیاری بهینه در تمامی کرت‌ها انجام گرفت. پس از رسیدن گیاه به مرحله پنج برگی، آبیاری بر اساس نیاز آبی هر تیمار و با استفاده از کنتورهای آب صورت گرفت. نیاز آبی گندم با استفاده از معادله پنمن-مونتیث فائو و دستورالعمل شماره ۵۶ فائو برای دوره‌های ۱۰ روزه و بر اساس آمار هواشناسی سال قبل از کاشت، از طریق نرم‌افزار CROPWAT محاسبه شد. بر اساس این محاسبات، نیاز آبی گیاه برابر با ۵۴۳۸ مترمکعب در هکتار تعیین گردید.

برای کنترل علف‌های هرز، از روش‌های شیمیایی شامل علف‌کش‌های 2-4-D به میزان ۱/۵ لیتر در هکتار و آپیروس به مقدار ۲۶ گرم در هکتار در مرحله پنجه‌زنی گندم، به همراه عملیات مکانیکی استفاده گردید. همچنین، برای حذف علف‌های هرز بین کرت‌ها، از کولتیوار بهره گرفته شد. در زمان نمونه‌برداری از ریشه گندم و تعیین عملکرد دانه و عملکرد زیستی، دو ردیف از هر طرف کرت و نیم متر از بالا و پایین آن به عنوان حاشیه در نظر گرفته شده و از فرآیند نمونه‌برداری حذف شدند.

رنگ‌آمیزی ریشه‌ها با روش فیلیپس و هایمن (Phillips & Hayman, 1970) و تعیین درصد کلونیزاسیون با استفاده از روش تقاطع خطوط شبکه اندازه‌گیری شدند (Kormanik & McGraw, 1982). ویژگی‌های عملکردی شامل عملکرد دانه (وزن دانه در هکتار)، عملکرد زیستی (وزن دانه + وزن کاه و کلش در هکتار)، وزن هزار دانه، شاخص برداشت و کارایی مصرف آب بر حسب عملکرد دانه و عملکرد زیستی مورد اندازه‌گیری و محاسبه قرار گرفتند. شاخص برداشت از تقسیم عملکرد دانه بر عملکرد زیستی به دست آمد (Unkovich *et al.*, 2010). شاخص کارایی مصرف آب (کیلوگرم به ازای هر متر مکعب آب مصرفی) بر مبنای عملکرد دانه یا عملکرد زیستی در هر تیمار با استفاده از فرمول زیر محاسبه شد (Bramley *et al.*, 2013):

$$WUE\ ({kg}/{m^3}) = \frac{Yield\ (kg)}{Irrigation\ water + Rainfall + Soil\ moisture\ (m^3)}$$

در این معادله WUE معادل کارایی مصرف آب، Yield معادل عملکرد دانه یا عملکرد زیستی، Irrigation water معادل حجم آب آبیاری، Rainfall معادل میزان بارندگی مؤثر در طول دوره رشد و Soil moisture معادل ذخیره رطوبتی خاک می‌باشد.

تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها با استفاده از آنالیز واریانس دو طرفه (two-way ANOVA) و مقایسه میانگین بین تیمارهای مختلف با آزمون توکی HSD در سطح احتمال ۵ درصد در نرم‌افزار JMP 8 انجام گرفت.

## نتایج

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی سطوح آبیاری و نوع کود زیستی بر کلنیزاسیون ریشه، وزن هزار دانه، عملکرد دانه، عملکرد زیستی، شاخص برداشت و کارایی مصرف آب بر حسب عملکرد دانه و عملکرد زیستی در سطح ۱ درصد معنی‌دار بود. اثر متقابل سطح آبیاری و نوع کود زیستی بر کلنیزاسیون ریشه در سطح ۱ درصد و بر عملکرد دانه، وزن هزاردانه و کارایی مصرف آب بر حسب عملکرد دانه در سطح ۵ درصد معنی‌دار شد (جدول ۲).

کاهش مقدار آب آبیاری موجب کاهش معنی‌داری درصد کلنیزاسیون ریشه در تمام تیمارهای آزمایشی شد ($p< 0.05$، شکل ۲).

مطابق انتظار بیشترین درصد کلنیزاسیون ریشه مربوط به کودهای زیستی قارچی بود. در بین کودهای زیستی قارچی، بیشترین درصد کلنیزاسیون ریشه مربوط به فرم پودری قارچ AM (F5) بود. به طوریکه درصد کلنیزاسیون ریشه در حضور این تیمار (F5) در سطوح آبیاری ۶۵، ۸۵ و ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه به‌ترتیب ۱۳، ۱۹ و ۸ درصد بیشتر از فرم مایع قارچ AM (F4) بود ($p< 0.05$، شکل ۲).

در تمام تیمارهای کود زیستی به جز باکتری *P. fluorescens* تولید کننده ACC–دآمیناز (F2)، افزایش تنش خشکی موجب کاهش وزن هزار دانه گندم شد (شکل ۳). در بین کودهای زیستی مورد بررسی، باکتری *P. fluorescens* تولید کننده ACC–دآمیناز (F2) و هر دو فرم قارچ AM (F4 و F5) در پر شدن دانه گندم و در نتیجه افزایش وزن هزاردانه نقش مثبت و معنی‌داری داشتند (شکل ۳). باکتری *P. fluorescens* تولید کننده ACC–دآمیناز (F2) در سطوح آبیاری ۶۵ و ۸۵ درصد نیاز آبی گیاه به‌ترتیب موجب افزایش ۲۸ و ۷ درصدی وزن هزاردانه شد که این افزایش تنها در سطح آبیاری ۶۵ درصد از لحاظ آماری معنی‌دار بود ($p< 0.05$، شکل ۳). وزن هزاردانه در تیمار تلقیح با فرم مایع (F4) و پودری (F5) قارچ AM به‌ترتیب در سطح آبیاری ۶۵ درصد نیاز آبی گیاه ۳۰ و ۳۱ درصد، در سطح آبیاری ۸۵ درصد نیاز آبی گیاه ۱۶ و ۲۵ درصد و در سطح آبیاری ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه ۱۶ و ۱۸ درصد نسبت به تیمار بدون کود زیستی افزایش یافت ($p< 0.05$، شکل ۳).

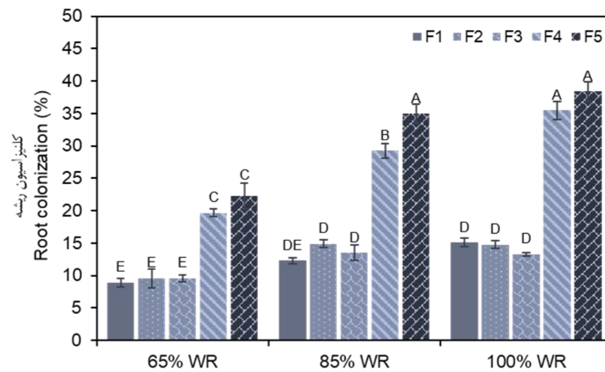
جدول ۲- تجزیه واریانس ویژگی‌های مورد بررسی

Table 2- Analysis of variance (ANOVA) for the studied properties

| منابع تغییرات S.O.V | درجه آزادی df | میانگین مربعات Mean of squares | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | کارایی مصرف آب (عملکرد زیستی) WUE (Biological yield) | کارایی مصرف آب (عملکرد دانه) WUE (Grain yield) | شاخص برداشت Harvest index | عملکرد زیستی Biological yield | عملکرد دانه Grain yield | وزن هزار دانه 1000-seed weight | کلنیزاسیون ریشه Root colonization |
| تکرار Replicate | 2 | 0.0014ns | 0.0002ns | 2.079ns | 34043ns | 6130ns | 1.778ns | 0.353ns |
| آبیاری Irrigation | 2 | 0.0713** | 0.0227** | 32.357** | 33327872** | 5656045** | 175.53** | 358.13** |
| خطای a Error a | 4 | 0.0004 | 0.0004 | 0.095 | 14527 | 2624 | 0.692 | 0.830 |
| کود زیستی Biofertilizer | 4 | 0.0760** | 0.0163** | 5.962** | 1502147** | 324056** | 101.77** | 850.40** |
| آبیاری×کود زیستی Irrigation× biofertilizer | 8 | 0.0014ns | 0.0005* | 2.949ns | 22855ns | 11938* | 10.66* | 29.91** |
| خطای b Error b | 24 | 0.0007 | 0.0001 | 3011 | 12962 | 3743 | 3.956 | 1.265 |

ns، ** و * به‌ترتیب بدون اختلاف معنی‌دار، معنی دار در سطح احتمال ۱ درصد و ۵ درصد

ns, **, and * indicate non-significant and significant at the 1% and 5% probability level, respectively

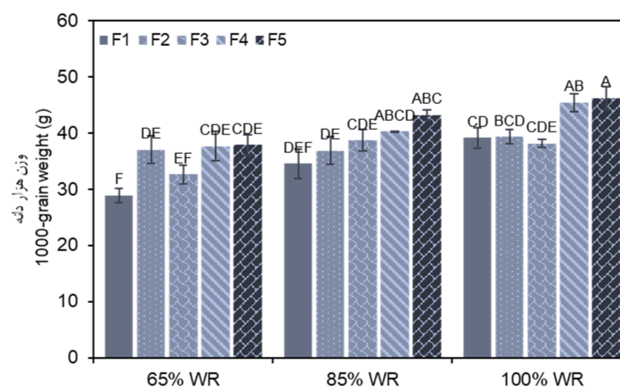



**شکل ۲- اثر متقابل سطح آبیاری و کود زیستی بر درصد کلنیزاسیون ریشه گندم**

حروف مختلف نشان دهنده تفاوت معنی‌دار بین تیمارها در سطح احتمال ۵ درصد است. میله‌های خطا نشان دهنده انحراف معیار است. 65% WR، 85% WR و 100% WR به ترتیب بیانگر ۶۵ ۸۵ و ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه است. F1: بدون کود زیستی، F2: باکتری P. fluorescens تولید کننده ACC–دآمیناز، F3: باکتری *P. fluorescens* بدون توان تولید ACC–دآمیناز، F4: قارچ AM به فرم مایع و F5: قارچ AM به فرم پودری.

**Figure 2- The interaction effect of irrigation levels and biofertilizers on root colonization percentage of wheat**

Different letters indicate significant differences between treatments at $p < 0.05$. Error bars represent standard deviation. 65% WR, 85% WR, and 100% WR correspond to 65%, 85%, and 100% of the plant's water requirement, respectively. F1: No biofertilizer, F2: *P. fluorescens* with ACC-deaminase, F3: *P. fluorescens* without ACC-deaminase, F4: AM fungi in liquid form, and F5: AM fungi in powder form.



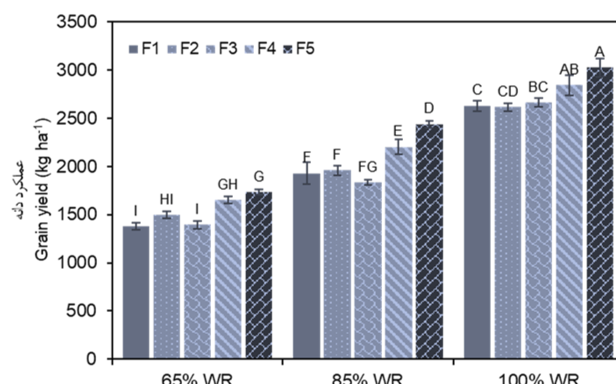

**شکل ۳- اثر متقابل سطح آبیاری و کود زیستی بر وزن هزاردانه گندم**

حروف مختلف نشان دهنده تفاوت معنی‌دار بین تیمارها در سطح احتمال ۵ درصد است. میله‌های خطا نشان دهنده انحراف معیار است. 65% WR، 85% WR و 100% WR به‌ترتیب بیانگر ۶۵ ۸۵ و ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه است. F1: بدون کود زیستی، F2: باکتری P. fluorescens تولید کننده ACC–دآمیناز، F3: باکتری *P. fluorescens* بدون توان تولید ACC–دآمیناز، F4: قارچ AM به فرم مایع و F5: قارچ AM به فرم پودری.

**Figure 3- The interaction effect of irrigation levels and biofertilizers on 1000-seed weight**

Different letters indicate significant differences between treatments at $p < 0.05$. Error bars represent standard deviation. 65% WR, 85% WR, and 100% WR correspond to 65%, 85%, and 100% of the plant’s water requirement, respectively. F1: No biofertilizer, F2: *P. fluorescens* with ACC-deaminase, F3: *P. fluorescens* without ACC-deaminase, F4: AM fungi in liquid form, and F5: AM fungi in powder form.

به‌طور کلی کاهش سطح آبیاری از ۱۰۰ درصد به ۸۵ و ۶۵ درصد نیاز آبی گیاه موجب کاهش ۲۵ و ۴۴ درصدی میانگین عملکرد دانه گندم شد. در بین کودهای زیستی، تنها کاربرد هر دو فرم قارچ AM موجب افزایش معنی‌دار عملکرد دانه گندم شد (شکل ۴). تلقیح بذر گندم با فرم مایع (F4) و پودری (F5) قارچ AM در سطح آبیاری ۶۵ درصد نیاز آبی گیاه موجب افزایش ۲۰ و ۲۶ درصدی، در سطح آبیاری ۸۵ درصد نیاز آبی گیاه موجب افزایش ۱۴ و ۲۶ درصدی و در سطح آبیاری ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه موجب افزایش ۸ و ۱۵ درصدی عملکرد دانه گندم نسبت به تیمار بدون کود زیستی شد ($p < 0.05$، شکل ۴). در تمام سطوح آبیاری کارایی فرم پودری قارچ AM در افزایش عملکرد دانه بیشتر از فرم مایع آن بود به هر حال این تفاوت تنها در سطح ۸۵ درصد نیاز آبی گیاه از نظر آماری معنی‌دار بود (شکل ۴). در سطح آبیاری ۶۵ درصد نیاز آبی گیاه، بذرمال گندم با باکتری *P. fluorescens* تولید کننده ACC–دآمیناز نیز موجب افزایش ۹ درصدی عملکرد دانه گندم نسبت به تیمار بدون کود زیستی شد که این افزایش از لحاظ آماری معنی‌دار نبود (شکل ۴).



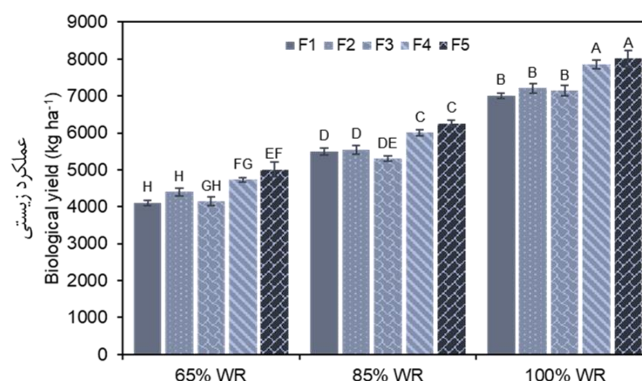

**شکل ٤- اثر متقابل سطح آبیاری و کود زیستی بر عملکرد دانه گندم**

حروف مختلف نشان دهنده تفاوت معنی‌دار بین تیمارها در سطح احتمال ۵ درصد است. میله‌های خطا نشان دهنده انحراف معیار است. 65% WR، 85% WR و 100% WR به‌ترتیب بیانگر ۶۵، ۸۵ و ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه است. F1: بدون کود زیستی، F2: باکتری P. fluorescens تولید کننده ACC–دآمیناز، F3: باکتری *P. fluorescens* بدون توان تولید ACC–دآمیناز، F4: قارچ AM به فرم مایع و F5: قارچ AM به فرم پودری.

**Figure 4- The interaction effect of irrigation levels and biofertilizers on grain yield**

Different letters indicate significant differences between treatments at $p< 0.05$. Error bars represent standard deviation. 65% WR, 85% WR, and 100% WR correspond to 65%, 85%, and 100% of the plant's water requirement, respectively. F1: No biofertilizer, F2: *P. fluorescens* with ACC-deaminase, F3: *P. fluorescens* without ACC-deaminase, F4: AM fungi in liquid form, and F5: AM fungi in powder form.

نتایج اثر متقابل سطح آبیاری و کود زیستی نشان داد که کاربرد باکتری *P. fluorescens* تولید کننده ACC–دآمیناز (F2) در سطح آبیاری ۶۵ درصد نیاز آبی گیاه موجب افزایش ۷ درصدی عملکرد زیستی گندم شد که از لحاظ آماری معنی‌دار نبود (شکل ۵). همچنین عملکرد زیستی گندم در تیمار تلقیح با فرم مایع (F4) و پودری (F5) قارچ AM به‌ترتیب در سطح آبیاری ۶۵ درصد نیاز آبی گیاه ۱۵ و ۲۱ درصد، در سطح آبیاری ۸۵ درصد نیاز آبی گیاه ۹ و ۱۴ درصد و در سطح آبیاری ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه ۱۲ و ۱۴ درصد نسبت به تیمار بدون کود زیستی افزایش یافت ($p< 0.05$، شکل ۵). همچنین نتایج اثر متقابل آبیاری و کود زیستی نشان داد که بیشترین و کمترین مقدار شاخص برداشت گیاه گندم به‌ترتیب با مقدار ۳۸/۹ و ۳۳/۶ مربوط به تیمار کاربرد فرم پودری قارچ AM (F5) در سطح آبیاری ۸۵ درصد نیاز آبی گیاه و تیمار بدون کود زیستی (F1) در سطح آبیاری ۶۵ درصد نیاز آبی گیاه بود ($p< 0.05$، شکل ۶).

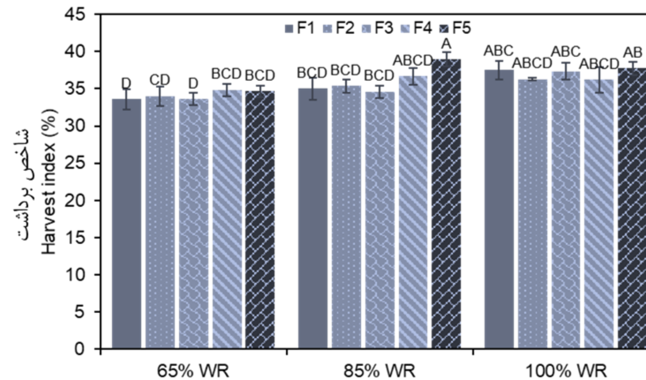



**شکل ۵- اثر متقابل سطح آبیاری و کود زیستی بر عملکرد زیستی گندم**

حروف مختلف نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار بین تیمارها در سطح احتمال ۵ درصد است. میله‌های خطا نشان دهنده انحراف معیار است. 65% WR، 85% WR و 100% WR به‌ترتیب بیانگر ۶۵، ۸۵ و ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه است. F1: بدون کود زیستی، F2: باکتری P. fluorescens تولید کننده ACC–دآمیناز، F3: باکتری *P. fluorescens* بدون توان تولید ACC–دآمیناز، F4: قارچ AM به فرم مایع و F5: قارچ AM به فرم پودری.

**Figure 5- The interaction effect of irrigation levels and biofertilizers on biological yield**

Different letters indicate significant differences between treatments at $p< 0.05$. Error bars represent standard deviation. 65% WR, 85% WR, and 100% WR correspond to 65%, 85%, and 100% of the plant's water requirement, respectively. F1: No biofertilizer, F2: *P. fluorescens* with ACC-deaminase, F3: *P. fluorescens* without ACC-deaminase, F4: AM fungi in liquid form, and F5: AM fungi in powder form.



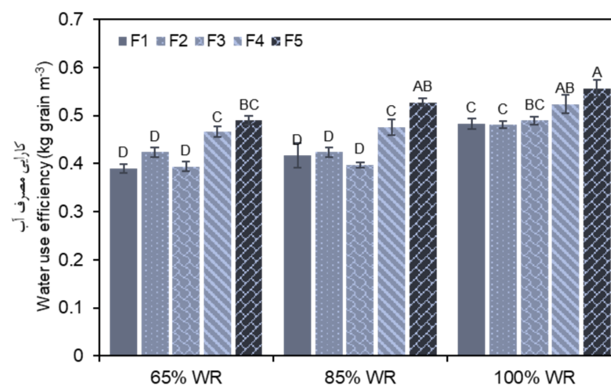

**شکل ٦- اثر متقابل سطح آبیاری و کود زیستی بر شاخص برداشت گندم**

حروف مختلف نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار بین تیمارها در سطح احتمال ۵ درصد است. میله‌های خطا نشان دهنده انحراف معیار است. 65% WR، 85% WR و 100% WR به‌ترتیب بیانگر ۶۵، ۸۵ و ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه است. F1: بدون کود زیستی، F2: باکتری P. fluorescens تولید کننده ACC-دآمیناز، F3: باکتری *P. fluorescens* بدون توان تولید ACC-دآمیناز، F4: قارچ AM به فرم مایع و F5: قارچ AM به فرم پودری.

**Figure 6- The interaction effect of irrigation levels and biofertilizers on harvest index**

Different letters indicate significant differences between treatments at $p< 0.05$. Error bars represent standard deviation. 65% WR, 85% WR, and 100% WR correspond to 65%, 85%, and 100% of the plant's water requirement, respectively. F1: No biofertilizer, F2: *P. fluorescens* with ACC-deaminase, F3: *P. fluorescens* without ACC-deaminase, F4: AM fungi in liquid form, and F5: AM fungi in powder form.

در تمام تیمارهای مورد بررسی با کاهش سطح آبیاری، مقدار کارایی مصرف آب گندم بر حسب عملکرد دانه نیز به‌طور معنی‌داری کاهش یافت ($p< 0.05$، شکل ۷). در بین کودهای زیستی باکتریایی (F2 و F3)، تنها کاربرد باکتری *P. fluorescens* تولید کننده ACC-دآمیناز (F2) در سطح آبیاری ۶۵ درصد نیاز آبی گیاه موجب افزایش ۸/۶ درصدی کارایی مصرف آب بر حسب عملکرد دانه نسبت به تیمار بدون کود زیستی شد که این افزایش از لحاظ آماری معنی‌دار نبود. کارایی مصرف آب گندم بر حسب عملکرد دانه در تیمارهای تلقیح با فرم مایع (F4) و پودری (F5) قارچ AM در سطح آبیاری ۶۵ درصد نیاز آبی گیاه به‌ترتیب ۲۰ و ۲۶ درصد، در سطح آبیاری ۸۵ درصد نیاز آبی گیاه به ترتیب ۱۴ و ۲۷ درصد و در سطح آبیاری ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه ۸ و ۱۵ درصد بیشتر از تیمار بدون کود زیستی در همان سطح آبیاری بود ($p< 0.05$، شکل ۷). به‌طور کلی کارایی مصرف آب گندم بر حسب عملکرد دانه در تیمار تلقیح با فرم پودری قارچ AM (F5) در هر سه سطح آبیاری بیشتر از فرم مایع آن (F4) بود که این تفاوت تنها در سطح ۸۵ درصد نیاز آبی گیاه معنی‌دار بود (شکل ۷).

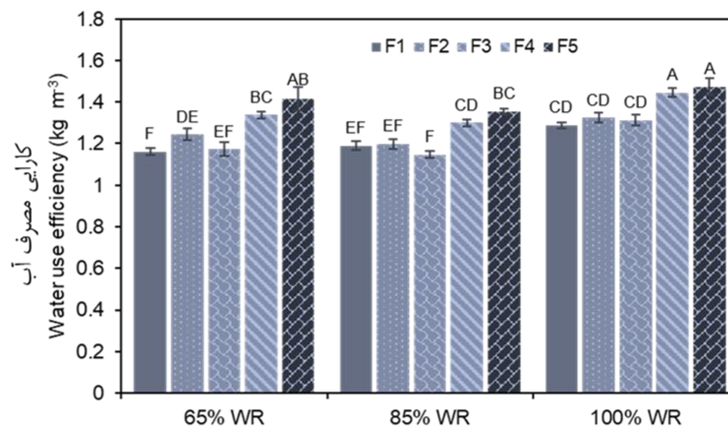



**شکل ۷- اثر متقابل سطح آبیاری و کود زیستی بر کارایی مصرف آب گندم برحسب عملکرد دانه**

حروف مختلف نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار بین تیمارها در سطح احتمال ۵ درصد است. میله‌های خطا نشان دهنده انحراف معیار است. 65% WR، 85% WR و 100% WR به‌ترتیب بیانگر ۶۵، ۸۵ و ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه است. F1: بدون کود زیستی، F2: باکتری P. fluorescens تولید کننده ACC-دآمیناز، F3: باکتری *P. fluorescens* بدون توان تولید ACC-دآمیناز، F4: قارچ AM به فرم مایع و F5: قارچ AM به فرم پودری.

**Figure 7- The interaction effect of irrigation levels and biofertilizers on water use efficiency based on grain yield**

Different letters indicate significant differences between treatments at $p< 0.05$. Error bars represent standard deviation. 65% WR, 85% WR, and 100% WR correspond to 65%, 85%, and 100% of the plant’s water requirement, respectively. F1: No biofertilizer, F2: *P. fluorescens* with ACC-deaminase, F3: *P. fluorescens* without ACC-deaminase, F4: AM fungi in liquid form, and F5: AM fungi in powder form.




**شکل ۸- اثر متقابل سطح آبیاری و کود زیستی بر کارایی مصرف آب گندم برحسب عملکرد زیستی**

حروف مختلف نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار بین تیمارها در سطح احتمال ۵ درصد است. میله‌های خطا نشان دهنده انحراف معیار است. 65% WR، 85% WR و 100% WR به‌ترتیب بیانگر ۶۵٪، ۸۵٪ و ۱۰۰٪ نیاز آبی گیاه است. F1: بدون کود زیستی، F2: باکتری P. fluorescens تولید کننده ACC–دآمیناز، F3: باکتری *P. fluorescens* بدون توان تولید ACC–دآمیناز، F4: قارچ AM به فرم مایع و F5: قارچ AM به فرم پودری.

**Figure 8- The interaction effect of irrigation levels and biofertilizers on water use efficiency based on biological yield**

Different letters indicate significant differences between treatments at $p< 0.05$. Error bars represent standard deviation. 65% WR, 85% WR, and 100% WR correspond to 65%, 85%, and 100% of the plant's water requirement, respectively. F1: No biofertilizer, F2: *P. fluorescens* with ACC-deaminase, F3: *P. fluorescens* without ACC-deaminase, F4: AM fungi in liquid form, and F5: AM fungi in powder form.

فرم پودری (F5) و مایع قارچ AM (F4) در سطح آبیاری ۶۵ درصد نیاز آبی گیاه موجب افزایش ۱۵ و ۲۲ درصدی کارایی مصرف آب گندم برحسب عملکرد زیستی نسبت به تیمار بدون کود زیستی شد ($p<$ 0.05، شکل ۸). این افزایش در سطح آبیاری ۸۵ درصد نیاز آبی گیاه به‌ترتیب ۹ و ۱۴ درصد و در سطح آبیاری ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه به ترتیب ۱۲ و ۱۴ درصد بود ($p< 0.05$، شکل ۸). همچنین باکتری *P. fluorescens* تولید کننده ACC–دآمیناز (F2) در سطح آبیاری ۶۵ درصد نیاز آبی گیاه موجب افزایش ۷ درصدی کارایی مصرف آب گندم برحسب عملکرد زیستی نسبت به تیمار بدون کود زیستی شد ولی این افزایش از لحاظ آماری معنی‌دار نبود.

## بحث

در بین کودهای زیستی باکتریایی، تنها تلقیح گندم با باکتری *P. fluorescens* تولید کننده ACC–دآمیناز (F2) در سطح آبیاری ۶۵ درصد نیاز آبی گیاه یا تنش آبی شدید نقش مثبتی در افزایش وزن هزار دانه، عملکرد دانه، عملکرد زیستی و در نتیجه کارایی مصرف آب برحسب عملکرد دانه و عملکرد زیستی داشت. پژوهش‌های بسیاری گزارش کردند که تاثیر مثبت باکتری‌های PGPR بر افزایش مقاومت به تنش خشکی و عملکرد محصول در شرایط تنش شدید بیشتر مشهود است (Moradgholi *et al.*, 2022; Rubin *et al.*, 2017). تحت شرایط آبیاری نرمال، گیاهان توانایی کافی برای جذب عناصرغذایی، به ویژه نیتروژن را دارند، بنابراین اثرات چنین باکتری‌هایی را می‌توان زمانی که گیاهان با تنش خشکی مواجه می‌شوند، بهتر مشاهده کرد. ما مشاهده کردیم که کاربرد باکتری *P. fluorescens* تولید کننده ACC–دآمیناز (F2) موجب افزایش ۹ درصدی عملکرد دانه و ۷ درصدی عملکرد زیستی در شرایط تنش آبی شدید شد (شکل ۴ و ۵). این افزایش با افزایش ۲۸ درصدی وزن هزار دانه همراه بود که تا حدودی افزایش عملکرد دانه در این تیمار را توضیح می‌دهد (شکل ۳).

مکانیسم اصلی باکتری *P. fluorescens* برای تسهیل رشد و نمو گیاه در شرایط تنش، کاهش سطح اتیلن با هیدرولیز ACC (پیشساز اتیلن در گیاهان) است (Zahir *et al.*, 2008). به گفته مایاک و همکاران (Mayak *et al.*, 2004) افزایش سطح ACC در گیاهانی که در معرض خشکی قرار دارند، غلظت اتیلن را در ریشه و اندام هوایی گیاهان افزایش می‌دهد. ریشه‌ها ACC انباشته شده را به ریزوسفر ترشح می‌کنند که توسط آنزیم ACC–دآمیناز ترشح شده از باکتری *P. fluorescens* به $NH_3$ و α–کتوبوتیرات تبدیل می‌شود و در نهایت سطح اتیلن کاهش می‌یابد (Mayak *et al.*, 2004). کاهش غلظت اتیلن تنشی منجر به گسترش بهتر ریشه در خاک می‌شود که نتیجه آن افزایش جذب آب و عناصرغذایی به دلیل افزایش گستره ریزوسفر می باشد (Glick *et al.*, 1997). توسعه بیشتر ریشه و در نتیجه جذب بهتر آب و عناصرغذایی از خاک با افزایش غلظت رنگدانه‌های فتوسنتزی، بهبود کارایی فتوشیمیایی فتوسیستم‌ها و افزایش تولید مواد فتوسنتزی و درنتیجه پر شدن بهتر دانه و افزایش وزن هزار دانه همراه است (Zarei *et al.*, 2020). پژوهش گذشته ما نیز نشان داد که تلقیح گندم با باکتری *P. fluorescens* تولید کننده ACC–دآمیناز موجب افزایش

غلظت رنگدانه‌های فتوسنتزی شامل کلروفیل و کاروتینوئید شد که این واقعیت را تأیید می‌کند (Hosseini *et al*., 2024).

بهبود در رشد گیاه و افزایش در عملکرد زیستی و عملکرد دانه در اثر تلقیح با باکتری *P. fluorescens* تولید کننده ACC–دآمیناز (تیمار F2) در شرایط تنش آبی شدید منجر به افزایش کارایی مصرف آب گیاه گندم شد (شکل ۷ و ۸). نتایج ما با یافته‌های سایر پژوهشگران که افزایش کارایی مصرف آب گیاه را در پاسخ به تلقیح با ریزوباکتری‌های تولید کننده ACC–دآمیناز گزارش کردند، مطابقت دارد (Akhtar *et al*., 2020; Brunetti *et al*., 2021; Yavuz *et al*., 2023). رحمان و همکاران گزارش کردند که تلقیح گندم با باکتری *Bacillus amyloliquefaciens* تولید کننده ACC–دآمیناز در تنش آبی شدید و ملایم به‌ترتیب موجب افزایش ۲۷/۹ و ۳۴/۳ درصدی کارایی مصرف آب و افزایش ۲۰/۰۳ و ۳۰/۷۷ درصدی عملکرد دانه گندم نسبت به تیمار شاهد شد (Rehman *et al*., 2024). با این حال نتایج پژوهش حاضر نشان دهنده تأثیر کم باکتری *P. fluorescens* تولید کننده ACC–دآمیناز یا عدم تأثیر باکتری *P. fluorescens* بدون توان تولید آنزیم ACC–دآمیناز بر عملکرد زیستی، عملکرد دانه و کارایی مصرف آب گیاه گندم بود. کاهش کارایی PGPRها در شرایط مزرعه احتمالاً ناشی از کیفیت نامناسب مایه تلقیح و ناتوانی باکتری‌ها در مقابله با جمعیت‌های بومی خاک در شرایط نامساعد باشد. سویه‌های PGPR تلقیح‌شده باید برای رقابت با جمعیت‌های بومی برای تهیه منابع محدود، زنده ماندن و کلونیزه کردن مناطق خاصی از ریشه‌ها کارآمد باشند (Ahluwalia *et al*., 2021). از طرف دیگر کارایی PGPRها در شرایط مزرعه به شدت تحت تأثیر شرایط اقلیمی و زیست‌محیطی از جمله نوع خاک، دما و بارندگی است (Tabassum *et al*., 2017). احتمالاً شرایط آب و هوایی نامناسب مانند کاهش شدید دما در مراحل ابتدایی رشد و استقرار گیاه در این آزمایش می‌تواند یکی از علل کاهش کارایی کودهای زیستی باکتریایی مورد استفاده باشد (شکل ۱). برای یک پاسخ موثر، PGPRها باید ریشه گیاه را کلونیزه کنند و همچنین به یک تراکم جمعیتی مشخصی از سویه‌های PGPR مورد نیاز است. برای این هدف باید غلظت‌های بیشتری از سویه‌های PGPR برای کاربرد در مزرعه به خاک داده شود (Kumar *et al*., 2019; Nadeem *et al*., 2016) و یا اینکه سویه‌های PGPR در طول فصل رشد طی چندین مرتبه بازتلقیح شوند. همچنین در مواردی که یک سویه باکتریایی در ارائه تحمل به استرس موثر نیست، مجموعه باکتریایی متشکل از چند سویه ممکن است سودمند باشد (Smyth *et al*., 2011).

هر دو فرم کود زیستی قارچی (F4 و F5) در تمام سطوح آبیاری موجب افزایش معنی‌دار وزن هزاردانه، عملکرد دانه و عملکرد زیستی گیاه گندم نسبت به کودهای زیستی باکتریایی و تیمار بدون کود زیستی شدند. به این ترتیب بیشترین مقدار وزن هزاردانه، عملکرد دانه و عملکرد زیستی مربوط به تیمارهای F4 و F5 در سطح آبیاری ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه بود (شکل ۳، ۴ و ۵). پژوهش‌های گذشته نقش مثبت قارچ‌های AM در افزایش عملکرد گندم و همچنین کارایی بیشتر این کودهای زیستی قارچی نسبت به کودهای زیستی باکتریایی را گزارش کردند (Azami-Atajan *et al*., 2020; Naseri *et al*., 2017; Omidvari *et al*., 2020; Yagini *et al*., 2020). برای مثال حسن پور و زند نشان دادند که عملکرد دانه گندم در تیمار تنش و بدون تلقیح ۵۴۳۷ کیلوگرم در هکتار بود اما در همین شرایط، تلقیح با قارچ *Rhizophagus irregularis* موجب افزایش آن به ۶۴۶۳ کیلوگرم در هکتار و تلقیح با باکتری *Azotobacter chroococcum* موجب افزایش آن به ۶۱۲۹ کیلوگرم در هکتار شد که نشان‌دهنده کارایی بیشتر قارچ AM بود (Hasanpour & Zand, 2014). این امر می‌تواند به دلیل مرفولوژی خاص قارچ‌های AM، توانایی بسیار بیشتر آنها برای تحمل شرایط سخت مثل دمای زیاد یا کم نسبت به PGPRها، توانایی نفوذ در بسترهای جامد (Bilal *et al*., 2017) و همچنین توانایی این قارچ‌ها در فراهم آوردن تمام کارکردهای اکولوژیکی ارائه شده و مشخصه باکتری‌های PGPR باشد (Hyde *et al*., 2019).

افزایش وزن هزار دانه در حضور قارچ‌های AM احتمالاً بخاطر اثر مثبت قارچ AM در افزایش توانایی گیاه در استفاده از ذخایر ساقه باشد (Naseri *et al*., 2017). در واقع، انتقال احتمالی مواد معدنی بین قسمت‌های مختلف گیاهان امکان‌پذیر است. ژانگ و همکاران انتقال نیتروژن از قسمت‌های رویشی گیاه به دانه‌های برنج در تیمارهای تلقیح شده با قارچ‌های AM را نشان دادند (Zhang *et al*., 2017). در مرحله پر شدن دانه، مقدار نیتروژن و فسفر در ریشه و اندام هوایی ذرت در گیاهان تلقیح شده با قارچ AM به طور قابل توجهی بیشتر بود، که نشان می‌دهد قارچ AM باعث انتقال بیشتر نیتروژن و فسفر در مرحله پر شدن دانه در گیاهان میزبان می‌شود (Azaizeh *et al*., 1995). پرشدن بهتر دانه و افزایش وزن آن در حضور قارچ‌های AM مستقیماً در افزایش عملکرد دانه نقش دارند.

افزایش عملکرد دانه و عملکرد زیستی گندم در حضور قارچ‌های AM می‌تواند به‌دلیل جذب بهتر آب و عناصرغذایی باشد. جوهانسون و همکاران بیان کردند که قارچ‌های AM عملکرد گیاه را در شرایط تنش خشکی از طریق جذب عناصرغذایی غیرمتحرک مانند فسفر، روی و مس افزایش می‌دهند (Johansson *et al*., 2004). قارچ‌های AM علاوه بر تأثیر مثبت بر توانایی گیاه در جذب و انتقال عناصر غذایی در شرایط تنش خشکی، از طریق تأثیری که بر ویژگی‌های فیزیولوژیکی گیاه و فعالیت‌های میکروبی خاک دارد می‌تواند عملکرد دانه و عملکرد زیستی گیاه را افزایش دهد. برای مثال افزایش عملکرد گندم در اثر تلقیح با قارچ‌های AM به‌دلیل بهبود محتوای نسبی آب برگ (RWC)، افزایش رنگدانه‌های فتوسنتزی و کاهش نشت الکترولیت توسط پژوهش‌های مختلفی گزارش شده است (Beltrano & Ronco,

(2008; Hosseini *et al.*, 2024; Yagini *et al.*, 2020). در واقع جذب بهتر آب و عناصرغذایی در تیمارهای تلقیح شده با قارچ AM موجب افزایش RWC و غلظت بیشتر رنگدانه‌های فتوسنتزی در برگ می‌شود و می‌تواند با افزایش سطح برگ و فعالیت فتوسنتزی عملکرد گیاه را افزایش دهد.

کودهای زیستی قارچی و به‌ویژه فرم پودری آن موجب افزایش شاخص برداشت شدند (شکل ۶). شاخص برداشت یکی از معیارهای فیزیولوژیکی مهم در گیاهان به شمار می‌آید و نشان‌دهنده کارایی توزیع مواد فتوسنتزی بین اندام‌های مختلف گیاه، به ویژه انتقال مواد به اندام‌های اقتصادی مانند دانه‌ها یا میوه‌ها است. قارچ‌های AM از طریق جذب بهتر آب و عناصرغذایی، طول دوره پر شدن دانه را بهبود داده و از این طریق موجب افزایش عملکرد دانه و شاخص برداشت شدند (Naseri rad *et al.*, 2021).

همچنین تلقیح با قارچ‌های AM در این پژوهش موجب افزایش کارایی مصرف آب گیاه گندم در هر سه سطح آبیاری شد که در راستای پژوهش‌های گذشته بود (Askari *et al.*, 2019; Azami-Atajan *et al.*, 2020; Birhane *et al.*, 2012; Omidvari *et al.*, 2020). پژوهش‌های مختلف افزایش کارایی مصرف آب در حضور قارچ‌های AM را به بهبود ویژگی‌های فیزیولوژیکی گیاه در نتیجه جذب بهتر آب و عناصرغذایی نسبت داده‌اند (Azami-Atajan *et al.*, 2020; Omidvari *et al.*, 2020; Tang *et al.*, 2022).

بین دو قارچ AM مورد مطالعه، فرم پودری قارچ AM (F5) نسبت به فرم مایع آن (F4) بیشترین کارایی را در افزایش وزن هزار دانه، عملکرد دانه، عملکرد زیستی و کارایی مصرف آب داشت. به هرحال این تفاوت تنها در سطح ۸۵ درصد نیاز آبی گیاه و برای عملکرد دانه و کارایی مصرف آب بر حسب عملکرد دانه معنی‌دار بود (شکل ۴ و ۷). این موضوع می‌تواند به‌دلیل کارایی بیشتر فرم پودری قارچ AM در کلنیزه کردن ریشه گیاه گندم (شکل ۲) و همچنین تنوع بیشتر قارچ‌های AM استفاده شده در آن باشد. در این پژوهش فرم پودری قارچ AM شامل سه گونه قارچی *Rhizophagus irregularis*، *Funneliformis mosseae* و *Claroideoglomus etunicatum* بود در حالی که فرم مایع آن تنها از گونه قارچی *Rhizophagus irregularis* تشکیل شده بود. پژوهش‌های مختلف نشان داده‌اند که مایه تلقیح حاوی گونه‌های مختلف قارچ AM نسبت به یک گونه قارچ منفرد در کلنیزه کردن ریشه از کارایی بیشتری برخوردار هستند (Majidi & Rejali, 2023; Pons & Müller, 2022; Rocha *et al.*, 2019). از طرفی با افزایش میزان کلنیزه شدن ریشه‌های گیاه توسط قارچ‌های AM، مقدار جذب عناصرغذایی و رشد گیاه اغلب افزایش می‌یابد (Treseder, 2013). پژوهش‌ها نشان داده‌اند که مایه تلقیح حاوی چندین گونه قارچ AM در مقایسه با مایه تلقیح تک‌گونه‌ای، توانایی بیشتری در افزایش فتوسنتز و جذب مواد غذایی گیاهان دارد و در نتیجه منجر به بهبود عملکرد گیاه می‌شود (Crossay *et al.*, 2019; Ortas & Ustuner, 2014; Parihar *et al.*, 2020; Pellegrino *et al.*, 2022). این امر به‌دلیل خدمات اکوسیستمی متنوعی است که مایه تلقیح چندگونه‌ای ارائه می‌دهد (Pellegrino *et al.*, 2022). علاوه بر این، گزارش‌ها حاکی از آن است که مایه تلقیح‌های پودری در پوشش‌دهی بذر گیاهان علفی مانند گندم و جو بیشترین کارایی را دارند، چرا که ساختار این بذرها باعث چسبندگی بهتر پودر می‌شود (Basiru *et al.*, 2020; Rocha *et al.*, 2019). در مقابل، مایه تلقیح‌های مایع بیشتر برای بذرهایی با سطح صاف مانند ذرت، لوبیا و یونجه مناسب هستند، زیرا چسبندگی مطلوبی ایجاد می کنند (Basiru *et al.*, 2020). همچنین کالوت و همکاران گزارش کردند که فرم مایع قارچ *Rhizophagus irregularis* در مقایسه با فرم جامد آن، اسپورهای کمتری تولید کرده و کلنیزاسیون ریشه‌های گیاه ترەفرنگی را کاهش داده است (Calvet *et al.*, 2013).

## نتیجه‌گیری

نتایج پژوهش حاضر نشان دهنده نقش مثبت آنزیم ACC–دآمیناز در باکتری‌های PGPR در کاهش سطح اتیلن تنشی و بهبود وزن هزار دانه، عملکرد دانه، عملکرد زیستی و کارایی مصرف آب گندم در شرایط تنش آبی شدید بود. همچنین قارچ‌های AM در فرم‌های پودری و مایع به خوبی توانستند وزن هزار دانه، عملکرد محصول، شاخص برداشت و در نتیجه کارایی مصرف آب را در هر سه سطح آبیاری بهبود دهند. نتایج این پژوهش نشان دهنده کارایی بیشتر کودهای زیستی قارچی نسبت به کودهای زیستی باکتریایی بود. این یافته‌ها تأیید می‌کند که کاربرد قارچ‌های AM می‌تواند به‌عنوان یک استراتژی مؤثر برای بهبود عملکرد گندم و افزایش کارایی مصرف آب در شرایط اقلیمی مشهد مورد استفاده قرار گیرد. همچنین نتایج ما نشان داد که فرم پودری قارچ AM در مقایسه با فرم مایع آن، به‌دلیل تنوع گونه‌ای و توانایی بالاتر در کلنیزه کردن ریشه، اثرات بهتری در افزایش عملکرد گندم داشت. به‌طور کلی تفاوت‌های مشاهده شده در کارایی این کودها نشان می دهد که انتخاب مناسب نوع و فرم کودهای زیستی می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی در مدیریت تنش آبی و بهبود تولید محصول مؤثر باشد.

## سپاسگزاری

بدین وسیله از ریاست محترم بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان خراسان رضوی جناب آقای دکتر زنگی‌آبادی که امکان اجرا این پژوهش را فراهم کردن صمیمانه تشکر و قدردانی می‌نماییم. همچنین از جناب آقای دکتر نیکخواه ریاست محترم ایستگاه تحقیقاتی طرق به خاطر کمک‌های بی دریغ ایشان در تهیه بذر، آماده‌سازی زمین و عملیات‌های داشت

صمیمانه تشکر و سپاسگزاری می‌کنیم. از آقای مهندس کمالی، کارشناس محترم بخش تحقیقات خاک و آب، و همچنین آقای مهندس عباسی، کارشناس ایستگاه تحقیقاتی طرق، به دلیل کمک‌های بی دریغشان در طی انجام این آزمایش صمیمانه تشکر و قدردانی می‌نماییم.

## References

1. Ahluwalia, O., Singh, P.C., & Bhatia, R. (2021). Resources, environment and sustainability a review on drought stress in plants : Implications, mitigation and the role of plant growth promoting rhizobacteria. *Resources, Environment and Sustainability*, *5*(July), 100032. https://doi.org/10.1016/j.resenv.2021.100032
2. Akhtar, S.S., Amby, D.B., Hegelund, J.N., Fimognari, L., Großkinsky, D.K., Westergaard, J.C., Müller, R., Moelbak, L., Liu, F., & Roitsch, T. (2020). Bacillus licheniformis FMCH001 increases water use efficiency via growth stimulation in both normal and drought conditions. *Frontiers in Plant Science*, *11*. https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00297
3. Amiri, R., Nikbakht, A., & Etemadi, N. (2015). Alleviation of drought stress on rose geranium [*Pelargonium graveolens* (L.) Herit.] in terms of antioxidant activity and secondary metabolites by mycorrhizal inoculation. *Scientia Horticulturae*, *197*, 373–380. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.062
4. Askari, A., Ardakani, M.R., Paknejad, F., & Hosseini, Y. (2019). Effects of mycorrhizal symbiosis and seed priming on yield and water use efficiency of sesame under drought stress condition. *Scientia Horticulturae*, *257*, 108749. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108749
5. Azaizeh, H.A., Marschner, H., Römheld, V., & Wittenmayer, L. (1995). Effects of a vesicular-arbuscular mycorrhizal fungus and other soil microorganisms on growth, mineral nutrient acquisition and root exudation of soil-grown maize plants. *Mycorrhiza*, *5*(5), 321–327. https://doi.org/10.1007/BF00207404
6. Azami-Atajan, F., Hammami, H., & Yaghoobzadeh, M. (2020). The application of plant growth promoting microorganisms and phosphate fertilizers on yield, yield components and water use efficiency of wheat at levels of irrigation water. *Journal of Crop Production*, *12*(4), 1–24. (In Persian with English abstract).
7. Barazetti, A.R., Simionato, A.S., Navarro, M.O.P., Santos, I.M.O. dos, Modolon, F., Andreata, M.F. de L., Liuti, G., Cely, M.V.T., Chryssafidis, A.L., Dealis, M.L., & Andrade, G. (2019). Formulations of arbuscular mycorrhizal fungi inoculum applied to soybean and corn plants under controlled and field conditions. *Applied Soil Ecology*, *142*, 25–33. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.05.015
8. Basiru, S., Mwanza, H.P., & Hijri, M. (2020). Analysis of Arbuscular mycorrhizal fungal inoculant benchmarks. *Microorganisms*, *9*(1), 81. https://doi.org/10.3390/microorganisms9010081
9. Beltrano, J., & Ronco, M.G. (2008). Improved tolerance of wheat plants (*Triticum aestivum* L.) to drought stress and rewatering by the arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus claroideum*: Effect on growth and cell membrane stability. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, *20*(1), 29–37. https://doi.org/10.1590/S1677-04202008000100004
10. Bilal, S., Khan, A.L., Shahzad, R., Asaf, S., Kang, S.-M., & Lee, I.-J. (2017). Endophytic *Paecilomyces formosus* LHL10 augments *Glycine max* L. adaptation to Ni-contamination through affecting *Endogenous phytohormones* and oxidative stress. *Frontiers in Plant Science*, *8*, 870. https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00870
11. Birhane, E., Sterck, F.J., Fetene, M., Bongers, F., & Kuyper, T.W. (2012). Arbuscular mycorrhizal fungi enhance photosynthesis, water use efficiency, and growth of frankincense seedlings under pulsed water availability conditions. *Oecologia*, *169*(4), 895–904. https://doi.org/10.1007/s00442-012-2258-3
12. Bramley, H., Turner, N.C., & Siddique, K.H.M. (2013). Water use efficiency. In C. Kole (Ed.), *Genomics and Breeding for Climate-Resilient Crops* (pp. 225–268). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-37048-9_6
13. Brunetti, C., Saleem, A.R., Della Rocca, G., Emiliani, G., De Carlo, A., Balestrini, R., Khalid, A., Mahmood, T., & Centritto, M. (2021). Effects of plant growth-promoting rhizobacteria strains producing ACC deaminase on photosynthesis, isoprene emission, ethylene formation and growth of *Mucuna pruriens* (L.) DC. in response to water deficit. *Journal of Biotechnology*, *331*, 53–62. https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2021.03.008
14. Calvet, C., Camprubi, A., Pérez-Hernández, A., & Lovato, P.E. (2013). Plant growth stimulation and root colonization potential of in vivo versus in vitro arbuscular mycorrhizal inocula. *HortScience Horts*, *48*(7), 897–901. https://doi.org/10.21273/HORTSCI.48.7.897
15. Cardoso, I., & Kuyper, T. (2006). Mycorrhizas and tropical soil fertility. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *116*(1–2), 72–84. https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.03.011

16. Carmen, C.A., Patricia, P., Rubén, B., & Victoria, S.M. (2016). Plant–Rhizobacteria interaction and drought stress tolerance in plants. In M. A. Hossain, S. H. Wani, S. Bhattacharjee, D. J. Burritt, & L.-S. P. Tran (Eds.), *Drought Stress Tolerance in Plants, Vol 1* (pp. 287–308). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-28899-4_12
17. Cheng, Z., Park, E., & Glick, B.R. (2007). 1-Aminocyclopropane-1-carboxylate deaminase from *Pseudomonas putida* UW4 facilitates the growth of canola in the presence of salt. *Canadian Journal of Microbiology*, *53*(7), 912–918. https://doi.org/10.1139/W07-050
18. Crossay, T., Majorel, C., Redecker, D., Gensous, S., Medevielle, V., Durrieu, G., Cavaloc, Y., & Amir, H. (2019). Is a mixture of arbuscular mycorrhizal fungi better for plant growth than single-species inoculants? *Mycorrhiza*, *29*(4), 325–339. https://doi.org/10.1007/s00572-019-00898-y
19. Garmendia, I., & Mangas, V. J. (2014). Comparative study of substrate-based and commercial formulations of arbuscular mycorrhizal fungi in Romaine lettuce subjected to salt stress. *Journal of Plant Nutrition*, *37*(11), 1717–1731. https://doi.org/10.1080/01904167.2014.889149
20. Glick, B.R., Liu, C., Ghosh, S., & Dumbroff, E.B. (1997). Early development of canola seedlings in the presence of the plant growth-promoting rhizobacterium *Pseudomonas putida* GR12-2. *Soil Biology and Biochemistry*, *29*(8), 1233–1239. https://doi.org/10.1016/S0038-0717(97)00026-6
21. Glick, B.R., Penrose, D. M., & Li, J. (1998). A model for the lowering of plant ethylene concentrations by plant growth-promoting bacteria. *Journal of Theoretical Biology*, *190*(1), 63–68. https://doi.org/10.1006/jtbi.1997.0532
22. Hasanpour, J., & Zand, B. (2014). Effect of wheat (*Triticum aestivum* L.) seed inoculation with bio-fertilizers on reduction of drought stress damage. *Iranian Journal of Seed Sciences and Research*, *1*(2), 1–12. (In Persian with English abstract).
23. Hashem, A., Abd_Allah, E.F., Alqarawi, A.A., Al Huqail, A.A., Egamberdieva, D., & Wirth, S. (2016). Alleviation of cadmium stress in *Solanum lycopersicum* L. by arbuscular mycorrhizal fungi via induction of acquired systemic tolerance. *Saudi Journal of Biological Sciences*, *23*(2), 272–281. https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2015.11.002
24. Hosseini, S.S., Rejali, F., & Keshavarz, P. (2024). Effect of some biofertilizers on the physiological characteristics of wheat flag leaves and rhizosphere enzyme activities at different irrigation levels. *Journal of Sol Biology*, *12*(1), 65–88. (In Persian with English abstract).
25. Hyde, K.D., Xu, J., Rapior, S., Jeewon, R., Lumyong, S., Niego, A.G.T., Abeywickrama, P.D., Aluthmuhandiram, J.V.S., Brahamanage, R.S., Brooks, S., Chaiyasen, A., Chethana, K.W.T., Chomnunti, P., Chepkirui, C., Chuankid, B., de Silva, N.I., Doilom, M., Faulds, C., Gentekaki, E., & Stadler, M. (2019). The amazing potential of fungi: 50 ways we can exploit fungi industrially. *Fungal Diversity*, *97*(1), 1–136. https://doi.org/10.1007/s13225-019-00430-9
26. Jalili, F., Khavazi, K., Pazira, E., Nejati, A., Rahmani, H. A., Sadaghiani, H.R., & Miransari, M. (2009). Isolation and characterization of ACC deaminase-producing fluorescent *Pseudomonads*, to alleviate salinity stress on canola (*Brassica napus* L.) growth. *Journal of Plant Physiology*, *166*(6), 667–674. https://doi.org/10.1016/j.jplph. 2008.08.004
27. Jiriaie, M., Fateh, E., & Aynehband, A. (2014). Evaluation the morph physiological changes in wheat cultivars from the use of *Mycorrhiza* and *Azospirillum*. *Iranian Journal of Field Crops Research*, *12*(4), 841–851. (In Persian with English abstract).
28. Johansson, J.F., Paul, L.R., & Finlay, R.D. (2004). Microbial interactions in the mycorrhizosphere and their significance for sustainable agriculture. *FEMS Microbiology Ecology*, *48*(1), 1–13. https://doi.org/10.1016/j.femsec.2003.11.012
29. Khan, Y., Shah, S., & Hui, T. (2022). The roles of arbuscular mycorrhizal fungi in influencing plant nutrients, photosynthesis, and Metabolites of Cereal Crops—A Review. *Agronomy*, *12*(9), 2191. https://doi.org/10.3390/agronomy12092191
30. Kormanik, P. P., & McGraw, A.-C. (1982). Quantification of vesicular-arbuscular mycorrhizae in plant roots. In N. C. Schenck (Ed.), *Methods and principles of mycorrhizal research* (pp. 37–47). American Phytopathological Society. https://api.semanticscholar.org/CorpusID:91636228
31. Kumar, A., Patel, J. S., Meena, V. S., & Srivastava, R. (2019). Recent advances of PGPR based approaches for stress tolerance in plants for sustainable agriculture. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, *20*, 101271. https://doi.org/10.1016/j.bcab.2019.101271
32. Li, H., Guo, Q., Jing, Y., Liu, Z., Zheng, Z., Sun, Y., Xue, Q., & Lai, H. (2020). Application of streptomyces pactum Act12 enhances drought resistance in wheat. *Journal of Plant Growth Regulation*, *39*(1), 122–132. https://doi.org/10.1007/s00344-019-09968-z

33. Li, J., Meng, B., Chai, H., Yang, X., Song, W., Li, S., Lu, A., Zhang, T., & Sun, W. (2019). Arbuscular mycorrhizal fungi alleviate drought stress in C3 (*Leymus chinensis*) and C4 (*Hemarthria altissima*) grasses via altering antioxidant enzyme activities and photosynthesis. *Frontiers in Plant Science*, *10*, 450785. https://doi.org/ 10.3389/fpls.2019.00499
34. Lim, J.-H., & Kim, S.-D. (2013). Induction of drought stress resistance by multi-functional PGPR *Bacillus licheniformis* K11 in pepper. *The Plant Pathology Journal*, *29*(2), 201–208. https://doi.org/10.5423/PPJ.SI.02.2013.0021
35. Majidi, A., & Rejali, F. (2023). Mycorrhizal symbiosis and glycine betaine effect foliar application on some agronomic traits of rainfed wheat in calcareous soils. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, *54*(2), 281–297. (In Persian with English abstract).
36. Malusà, E., Pinzari, F., & Canfora, L. (2016). Efficacy of biofertilizers: Challenges to improve crop production. in *Microbial Inoculants in Sustainable Agricultural Productivity* (pp. 17–40). Springer India. https://doi.org/10.1007/978-81-322-2644-4_2
37. Mathur, S., Tomar, R.S., & Jajoo, A. (2019). Arbuscular Mycorrhizal fungi (AMF) protects photosynthetic apparatus of wheat under drought stress. *Photosynthesis Research*, *139*(1–3), 227–238. https://doi.org/10.1007/s11120-018-0538-4
38. Mayak, S., Tirosh, T., & Glick, B.R. (2004). Plant growth-promoting bacteria that confer resistance to water stress in tomatoes and peppers. *Plant Science*, *166*(2), 525–530. https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2003.10.025
39. Moradgholi, A., Mobasser, H., Ganjali, H., Fanaie, H., & Mehraban, A. (2022). WUE, protein and grain yield of wheat under the interaction of biological and chemical fertilizers and different moisture regimes. *Cereal Research Communications*, *50*(1), 147–155. https://doi.org/10.1007/s42976-021-00145-1
40. Nadeem, S. M., Ahmad, M., Zahir, Z. A., Javaid, A., & Ashraf, M. (2014). The role of mycorrhizae and plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) in improving crop productivity under stressful environments. *Biotechnology Advances*, *32*(2), 429–448. https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2013.12.005
41. Nadeem, S.M., Naveed, M., Ayyub, M., Khan, M.Y., Ahmad, M., & Zahir, Z.A. (2016). Potential, limitations and future prospects of *Pseudomonas* spp. for sustainable agriculture and environment: A Review. *Soil & Environment*, *35*(2).
42. Naseri, R., Barary, M., Zarea, M. J., Khavazi, K., & Tahmasebi, Z. (2017). Effect of plant growth promoting bacteria and Mycorrhizal fungi on growth and yield of wheat under dryland conditions. *Journal of Sol Biology*, *5*(1), 49–66. (In Persian with English abstract).
43. Naseri rad, H., Naseri, R., Mirzaei, A., & Zarei, B. (2021). Effects of phosphorous fertilizer and mycorrhizal fungi on yield and yield components of durum wheat (*Triticum turgidum* var. durum) under rainfed condition. *Applied Field Crops Research*, *34*(3), 43–68. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.21608/ajas.2021.93649.1043
44. Oliveira, R.S., Rocha, I., Ma, Y., Vosátka, M., & Freitas, H. (2016). Seed coating with arbuscular mycorrhizal fungi as an ecotechnologicalapproach for sustainable agricultural production of common wheat (*Triticum aestivum* L.). *Journal of Toxicology and Environmental Health. Part A*, *79*(7), 329–337. https://doi.org/10.1080/15287394.2016.1153448
45. Olumi somarin, S., Ajali, J., Faramarzi, A., Abdi, M., & Nazari, N. (2023). Study of the effect of irrigation, mycorrhiza, and azospirillum on the quantitative and qualitative yield of barley varieties. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, *54*(2), 407–427. (In Persian with English abstract).
46. Omidvari, S., Salamati, N., & Abdi, S. (2020). Study the effects of irrigation regime and biofertilizers on yield and yield component of wheat. *Journal of Crops Improvement*, *22*(2), 193–204. (In Persian with English abstract).
47. Ortas, I., & Ustuner, O. (2014). The effects of single species, dual species and indigenous mycorrhiza inoculation on citrus growth and nutrient uptake. *European Journal of Soil Biology*, *63*, 64–69. https://doi.org/10.1016/ j.ejsobi.2014.05.007
48. Parihar, M., Rakshit, A., Rana, K., Prasad Meena, R., & Chandra Joshi, D. (2020). A consortium of arbuscular mycorrizal fungi improves nutrient uptake, biochemical response, nodulation and growth of the pea (*Pisum sativum* L.) under salt stress. *Rhizosphere*, *15*, 100235. https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2020.100235
49. Pellegrino, E., Nuti, M., & Ercoli, L. (2022). Multiple arbuscular mycorrhizal fungal consortia enhance yield and fatty acids of *Medicago sativa*: A two-year field study on agronomic traits and tracing of fungal persistence. *Frontiers in Plant Science*, *13*. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.814401
50. Phillips, J., & Hayman, D. (1970). Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and

vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. *Transactions of the British Mycological Society*, *55*(1), 158–161. https://doi.org/10.1016/S0007-1536(70)80110-3

51. Pons, C., & Müller, C. (2022). Impacts of Drought Stress and Mycorrhizal Inoculation on the Performance of Two Spring Wheat Cultivars. *Plants*, *11*(17), 2187. https://doi.org/10.3390/plants11172187
52. Rahimi, Z., Hosseinpanahi, F., & Siosemardeh, A. (2019). Evaluation of yield, radiation and water use efficiency of drought resistant and susceptible wheat cultivars under different irrigation levels. *Plant Production and Genetics*, *2*(1), 19–34. (In Persian with English abstract). https://jwr.uok.ac.ir/article_61144.html
53. Rehman, M.M.U., Zhu, Y., Abrar, M., Khan, W., Wang, W., Iqbal, A., Khan, A., Chen, Y., Rafiq, M., Tufail, M. A., Ye, J.-S., & Xiong, Y.-C. (2024). Moisture- and period-dependent interactive effects of plant growth-promoting rhizobacteria and AM fungus on water use and yield formation in dryland wheat. *Plant and Soil*, *502*(1), 149–165. https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1516690/v1
54. Rocha, I., Duarte, I., Ma, Y., Souza-Alonso, P., Látr, A., Vosátka, M., Freitas, H., & Oliveira, R.S. (2019). Seed Coating with arbuscular mycorrhizal fungi for improved field production of Chickpea. *Agronomy*, *9*(8), 471. https://doi.org/10.3390/agronomy9080471
55. Rocha, I., Ma, Y., Souza-Alonso, P., Vosátka, M., Freitas, H., & Oliveira, R.S. (2019). Seed coating: A tool for delivering beneficial microbes to agricultural crops. *Frontiers in Plant Science*, *10*. https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01357
56. Rubin, R.L., van Groenigen, K.J., & Hungate, B.A. (2017). Plant growth promoting rhizobacteria are more effective under drought: a meta-analysis. *Plant and Soil*, *416*(1–2), 309–323. https://doi.org/10.1007/s11104-017-3199-8
57. Ruíz-Sánchez, M., Armada, E., Muñoz, Y., García de Salamone, I.E., Aroca, R., Ruíz-Lozano, J.M., & Azcón, R. (2011). Azospirillum and arbuscular mycorrhizal colonization enhance rice growth and physiological traits under well-watered and drought conditions. *Journal of Plant Physiology*, *168*(10), 1031–1037. https://doi.org/10.1016/j.jplph.2010.12.019
58. Sahu, P. K., & Brahmaprakash, G. P. (2016). Formulations of biofertilizers – Approaches and advances. In R. Singh, D., Singh, H., Prabha (Ed.), *Microbial Inoculants in Sustainable Agricultural Productivity* (pp. 179–198). Springer India. https://doi.org/10.1007/978-81-322-2644-4_12
59. Saif, S., Abid, Z., Ashiq, M.F., Altaf, M., & Ashraf, R.S. (2021). Biofertilizer formulations. In *Biofertilizers* (pp. 211–256). Wiley. https://doi.org/10.1002/9781119724995.ch7
60. Siddiqui, Z. A., & Kataoka, R. (2011). Mycorrhizal inoculants: Progress in inoculant production technology. In *Microbes and Microbial Technology* (pp. 489–506). Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7931-5_18
61. Smyth, E.M., McCarthy, J., Nevin, R., Khan, M. R., Dow, J.M., O'Gara, F., & Doohan, F.M. (2011). In vitro analyses are not reliable predictors of the plant growth promotion capability of bacteria; a *Pseudomonas fluorescens* strain that promotes the growth and yield of wheat. *Journal of Applied Microbiology*, *111*(3), 683–692. https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2011.05079.x
62. Tabassum, B., Khan, A., Tariq, M., Ramzan, M., Iqbal Khan, M.S., Shahid, N., & Aaliya, K. (2017). Bottlenecks in commercialisation and future prospects of PGPR. *Applied Soil Ecology*, *121*(October), 102–117. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.09.030
63. Tang, H., Hassan, M.U., Feng, L., Nawaz, M., Shah, A.N., Qari, S.H., Liu, Y., & Miao, J. (2022). The critical role of arbuscular mycorrhizal fungi to improve drought tolerance and nitrogen use efficiency in crops. *Frontiers in Plant Science*, *13*. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.919166
64. Treseder, K. K. (2013). The extent of mycorrhizal colonization of roots and its influence on plant growth and phosphorus content. *Plant and Soil*, *371*(1), 1–13. https://doi.org/10.1007/s11104-013-1681-5
65. Unkovich, M., Baldock, J., & Forbes, M. (2010). Variability in harvest index of grain crops and potential significance for carbon accounting. In D. L. Sparks (Ed.), *Advances in Agronomy* (Vol. 105, pp. 173–219). Academic Press. https://doi.org/10.1016/S0065-2113(10)05005-4
66. Yagini, F., seyed sharifi, R., Khomari, S., & Gasemi, M. (2020). Effect of supplementary irrigation and seed inoculation with bio fertilizers on yield and some physiological traits of rainfed wheat. *Jispp*, *9*(39), 147–163. (In Persian with English abstract). http://jispp.iut.ac.ir/article-1-1321-en.html
67. Yavuz, D., Baştaş, K. K., Seymen, M., Yavuz, N., Kurtar, E. S., Süheri, S., Türkmen, Ö., Gür, A., & Kıymacı, G. (2023). Role of ACC deaminase-producing rhizobacteria in alleviation of water stress in watermelon. *Scientia Horticulturae*, *321*, 112288. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112288
68. Zabihi, H. R., Savaghebi, G. R., Khavazi, K., Ganjali, A., & Miransari, M. (2011). *Pseudomonas* bacteria and phosphorous fertilization, affecting wheat (*Triticum aestivum* L.) yield and P uptake under greenhouse

and field conditions. *Acta Physiologiae Plantarum*, *33*(1), 145–152. https://doi.org/10.1007/s11738-010-0531-9

69. Zahir, Z.A., Munir, A., Asghar, H.N., Shaharoona, B., & Arshad, M. (2008). Effectiveness of rhizobacteria containing ACC deaminase for growth promotion of peas (*Pisum sativum*) under drought conditions. *JOournal Microbiology Biotechnology*, *18*(5), 958–963. https://doi.org/10.1016/s1002-0160(08)60055-7
70. Zarei, T., Moradi, A., Kazemeini, S.A., Akhgar, A., & Rahi, A.A. (2020). The role of ACC deaminase producing bacteria in improving sweet corn (*Zea mays* L. var *saccharata*) productivity under limited availability of irrigation water. *Scientific Reports*, *10*(1), 20361. https://doi.org/10.1038/s41598-020-77305-6
71. Zhang, X., Wang, L., Ma, F., Yang, J., & Su, M. (2017). Effects of arbuscular mycorrhizal fungi inoculation on carbon and nitrogen distribution and grain yield and nutritional quality in rice (*Oryza sativa* L.). *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *97*(9), 2919–2925. https://doi.org/https://doi.org/10.1002/jsfa.8129